



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Influencia de la inclinación del haz de luz incidente en las aberraciones oculares

Julián Espinosa*, David Mas, Jorge Pérez, Carmen Vázquez, Carlos Illueca, Juan José Miret, Consuelo Hernández, Begoña Domenech

Grupo de Óptica y Ciencias de la Visión (www.ocivis.net)
Dpto. de Óptica, Farmacología y Anatomía. Universidad de Alicante.



Líneas de Investigación: Estudio y diseño de elementos ópticos oftálmicos externos e internos. Análisis de la calidad óptica de imágenes. Técnicas no-invasivas de medida de parámetros oculares. Cálculo numérico de patrones de luz a diferentes distancias. Métodos ópticos de análisis de superficies.

(*) julian.espinosa@ua.es

RESUMEN

Casi la mitad de la población tiene astigmatismo corneal normalmente pequeño y afecta muy poco a la imagen retiniana. El ojo no es un sistema centrado sino que la línea de mirada está desviada del eje óptico. Concretamente, la línea de mirada está inclinada hacia el lado temporal por lo que aparecen aberraciones fuera de eje, principalmente coma y astigmatismo oblicuo, debido a la incidencia oblicua de la luz. Taberner et al. Han determinado que el tilt horizontal del cristalino genera una aberración comática horizontal que se compensa con la incidencia oblicua de la luz en el ojo. En este trabajo establecemos que el astigmatismo corneal puede también compensar las aberraciones oblicuas. Proponemos un modelo teórico de ojo según los parámetros de Kooijman con astigmatismo corneal según la regla. Consideramos rayos de luz con diferentes ángulos de incidencia y obtenemos los patrones de luz en retina. Utilizamos un criterio de calidad para determinar el ángulo de incidencia que proporciona una mejor respuesta impulsional (PSF). Nuestros resultados muestran que la mejor imagen se obtiene para una incidencia inclinada compatible con los valores medios de ángulo kappa. Así, esto sugiere un mecanismo de compensación pasiva de las aberraciones por parte de la córnea y del cristalino.

MÉTODO

Modelo de ojo

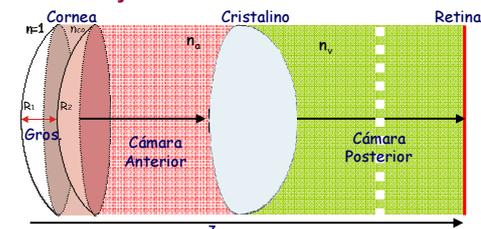


Figura 1. Esquema del modelo de ojo

Superficies

$$z(x, y) = \frac{R_y}{(1+Q)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(1+Q)}{R_y} \left(\frac{x^2}{R_x} + \frac{y^2}{R_y} \right)} \right]$$

Superficie	Córnea Anterior	Córnea Posterior	Cristalino Anterior	Cristalino Posterior
Rado (mm)	$R_1=7.8$ $R_2=7.9$	6.5	10.2	-6.0
Constante Cónica Q	-0.25	-0.25	-3.06	-1.0
Grosor (mm)	0.55	3.05	4.0	16.6
Índice de Refracción	1.3771	1.3374	1.42	1.336

Trazado de rayos a través del ojo

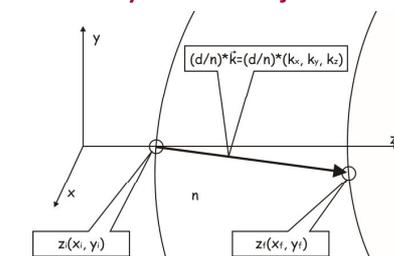


Figura 2. Esquema de obtención del camino óptico entre superficies

$$z_i(x_i, y_i) + \left(\frac{d}{n} \right) k_{z,i} = z_f \left(x_f + \left(\frac{d}{n} \right) k_{x,f}, y_f + \left(\frac{d}{n} \right) k_{y,f} \right)$$

$$\text{Transmitancia } u_0(x, y) = \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda} [d_{tot}(x, y)]\right)$$

Propagación

$$(u_z)_\mu \propto DFT^{-1} \left\{ \exp\left(-i\pi \frac{\lambda z}{(\Delta x_0)^2} m^2\right) \times \right. \\ \left. \times DFT \left[u_0 \left(\frac{m \Delta x_0}{N} \right) \exp\left(-i\pi \frac{m^2 (\Delta x_0)^2}{\lambda N^2} \frac{1}{z_c} \right) \right] \right\}$$

$$\text{Función de mérito } Q = \frac{\max[I(x, y)]}{M(x_0, y_0)}$$

$$\text{Intensidad } I(x, y) = |u_0(x, y)|^2$$

$$\text{Posición centroide } (x_0, y_0) = \frac{(\sum I(x, y)x, \sum I(x, y)y)}{\sum I(x, y)}$$

Segundo momento

$$M(x_0, y_0) = \sum I(x, y) \cdot [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]$$

Descomposición polinómica del frente de ondas

$$W(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{p-1} g_j \rho^j M_m(\theta)$$

$$M_m(\theta) = \begin{cases} \cos(m\theta) & m \geq 0 \\ \sin(m\theta) & m < 0 \end{cases}$$

Potencia refractiva

$$\hat{F}(r, \theta) \equiv \left(\frac{\partial W(r, \theta)}{\partial r} \right) r^{-1} = r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left[\sum_{j=3}^{p-1} g_j r^j M_m(\theta) \right] = \sum_{j=3}^{p-1} j g_j r^{j-2} M_m(\theta)$$

RESULTADOS

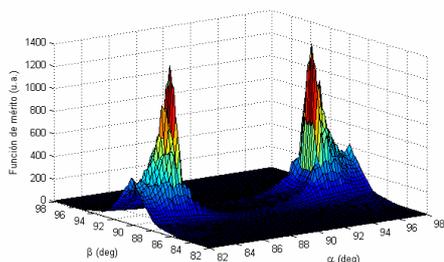


Figura 3. Valores de la función de mérito para ángulos de incidencia vertical y horizontal en el rango $[-8^\circ, 8^\circ]$.

Puede observarse que se alcanza un máximo para $(\alpha, \beta) = (84.8^\circ, 90^\circ)$ y $(\alpha, \beta) = (95.2^\circ, 90^\circ)$, i.e., para un haz incidente en córnea inclinado $\pm 5.2^\circ$ en dirección horizontal. Diferentes córneas astigmáticas proporcionarían máximos en la función de mérito para diferentes ángulos.

En la figura 4 mostramos la PSF obtenida para $\beta = 90^\circ$ y $\alpha = [82^\circ, 98^\circ]$. Se observa que la PSF correspondiente a $\alpha = 84.6^\circ$ es mejor que para los demás ángulos de incidencia

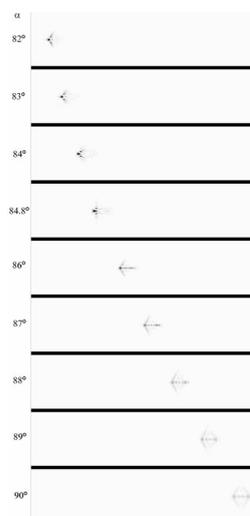


Figura 4. PSF retiniana para diferentes ángulos de incidencia.

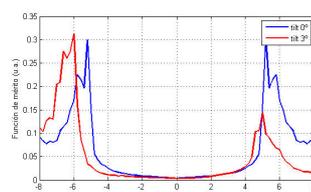


Figura 5. Función de mérito en eje x para el ojo modelado con un cristalino inclinado un ángulo 0° y 3° .

En la figura 5 comparamos la función de mérito para $\beta = 90^\circ$ considerando un cristalino sin tilt y con una inclinación de 3° en dirección x. En ambos casos se observan 2 picos correspondientes a la mejor PSF con incidencia oblicua. Además, en el caso con el cristalino inclinado, la simetría de los picos se rompe, apareciendo un pico más alto para un ángulo de incidencia $\gamma = 6^\circ$.

En la figura 6, el caso de cristalino inclinado muestra unas componentes astigmáticas y comáticas asimétricas. Además, los máximos y mínimos están desplazados con respecto al caso sin inclinación en el cristalino. Se observa que en la región desde $\gamma = -6^\circ$ hasta $\gamma = 7^\circ$ hay un descenso importante tanto en astigmatismo como en coma. Teniendo en cuenta que en la figura 5 el pico de la función de mérito se encontraba para un ángulo $\gamma = -6^\circ$, parece que en este punto ambas aberraciones se compensan para proporcionar una buena PSF.

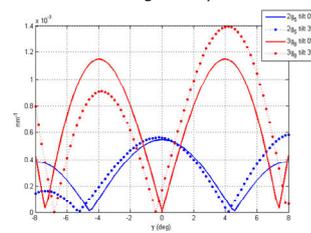


Figura 6. Componentes absolutas astigmáticas x/y y comáticas x/y de la potencia refractiva para el ojo modelado con un cristalino inclinado un ángulo 0° y 3° .

REFERENCIAS

- Pérez J.; Mas, D., Illueca, C., Miret, J.J., Vázquez, C. and Hernández, C. *Complete algorithm for the calculation light patterns inside the ocular media*. J. Modern Optics, 52 (1161-1176), 2005.
Espinosa, J., Mas, D., Pérez, J., Illueca, C. *Adaptive sampling in convergent beams*. Opt. Letters, 33 (1960-1962), 2008.
Taberner, J., Benito, A., Alcón E., Artal, P. *Mechanism of compensation of aberrations in the human eye*. J. Opt. Soc. Am. A, 24 (3274-3283), 2007

- Kooijman, A. *Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye*. J. Opt. Soc. Am. A, 73 (1544-1550), 1983.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos FIS2005-05053 del Ministerio de Educación y Cultura y GRE07-7P, de la Universidad de Alicante.